

# ماهیت نویز پروانه شناور

محمودرضا عباسی\*

۱- استادیار، عضو هیئت علمی دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (علیه السلام)

## چکیده

پیش‌بینی نوسانات فشار ناشی از پروانه و نویز تابشی زیر آب موضوعی است که در مهندسی دریایی مورد توجه و علاقه زیادی قرار دارد. با این وجود، اندازه‌گیری نویز در حالت مقیاس کامل همچنان یک کار چالش‌برانگیز می‌باشد؛ این به دلیل پدیده‌های مختلف است که در میان آنها اثرات مقیاس بر روی کاویتاسیون و دنباله کشتی، محیط محدود و اثرات میدان نزدیک در آزمایش‌های مدل نقش مهمی دارند. تجزیه و تحلیل این مسائل به دلیل حجم نسبتاً محدود داده‌های موجود آزمایش‌های دریایی و پیچیدگی‌های پدیده‌هایی که بیشتر آن‌ها مربوط به کاویتاسیون بر روی پره‌های پروانه هستند و در اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در تونل‌های کاویتاسیون وجود دارند، دشوار می‌شود. در این مقاله به بررسی طیف نویز حاصل از پروانه‌های کاویتاسیونی و غیرکاویتاسیونی پرداخته و سطح کلی نویز اندازه‌گیری‌شده در باند ۱۰۰ هرتز تا ۱۰ کیلوهرتز بر اساس تابعی از سرعت نوک پروانه و تعداد تیغه برای کشتی‌های زیر ۱۰۰ متر، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## واژه‌های کلیدی

پروانه، نویز، کاویتاسیون، غیرکاویتاسیون، زیر آب

## Nature Of Propeller Noise

Mahmoud Reza Abbasi

Imam Hossein University, Science College, Basic Science Department

### Abstract

The prediction of propeller induced pressure fluctuations and underwater-radiated noise is a subject of great and increasing interest in marine engineering. Nevertheless, the full-scale prediction of noise still a challenging task. This is due to different phenomena, among which scale effects on cavitation and ship wake, confined environment and near field effects in model tests play an important role. The analysis of these problems is made difficult by the rather limited amount of available data from sea trials and to the complexities of the phenomena, most of which related to cavitation on the propeller blades, that are present in the measurements carried out in cavitation tunnels. In this paper, we examine the spectrum of noise from cavitation and non-cavitation propellers, and we examine the overall noise level measured in the band 100 Hz to 10 kHz based on the speed of the tip of the propeller and the number of blades for ships under 100 meters.

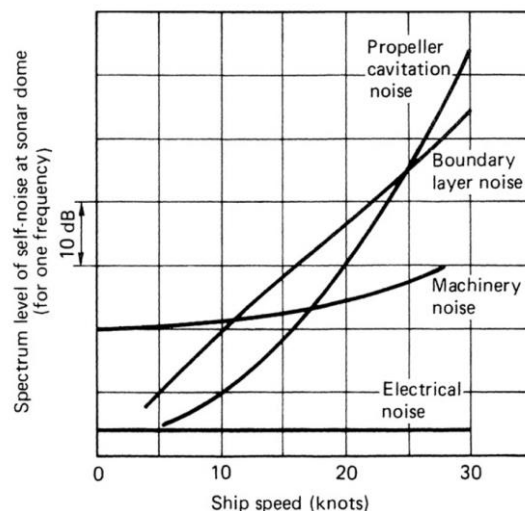
### Keywords

Propeller, Noise, Cavitation, Non-Cavitation, Underwater.

\* Corresponding author: phys.ocean.abbasi@gmail.com

پنج مکانیسم اصلی وجود دارد که توسط آنها یک پروانه می‌تواند امواج فشاری در آب ایجاد کند و از این رو ایجاد نویز نماید [۱]. این مکانیسم‌ها عبارتند از:

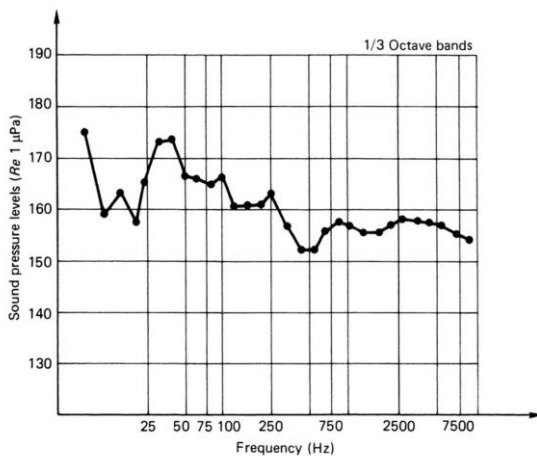
۱. جابجایی آب توسط نیمرخ تیغه پروانه
  ۲. اختلاف فشار بین مکش و سطوح تحت فشار تیغه پروانه زمانی که در حال چرخش هستند.
  ۳. جریان بر روی سطوح تیغه‌های پروانه.
  ۴. نوسانات دوره‌ای وجود کاویتاسیون ناشی از عملکرد تیغه‌ها در میدان دنباله متغیر پشت کشتی
  ۵. فرآیندهای فروپاشی ناگهانی حباب کاویتاسیون.
- واضح است که سه علت اول با پروانه در حالت کاویتاسیونی یا غیر کاویتاسیونی مرتبط هستند. با این حال، آنها اثرات غیر کاویتاسیونی هستند. دو علت بعدی پدیده‌های وابسته به کاویتاسیون هستند و تنها زمانی رخ می‌دهند که پروانه در حال ورود به حالت کاویتاسیون باشد. بنابراین، نویز پروانه را می‌توان شامل دو جزء اصلی در نظر گرفت: یک جزء غیر کاویتاسیونی و یک جزء کاویتاسیونی. از نظر مشخصه نویز یک کشتی، قبل از شروع کاویتاسیون، تمام اجزای نویز ناشی از ماشین‌آلات، بدنه و پروانه مهم هستند. اما پس از شروع کاویتاسیون، با وجود نویز بدنه و منابع ماشین‌آلات، نویز پروانه معمولاً عامل غالب می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱- نمونه‌ای از تغییرات خود نویز شناور بر اساس سرعت شناور [۲]

در شکل ۱، نویز خودی ایجاد شده و اندازه‌گیری شده در گنبد سونار یک کشتی جنگی دیده می‌شود. شکل، سطوح نویز مقایسه‌ای را در این محل از لایه‌مرزی بدنه، ماشین‌آلات، نویز الکتریکی و پروانه نشان می‌دهد. نکته قابل توجه در این شکل واقع شدن پروانه در سمت مخالف کشتی با گنبد سونار است که از این رو می‌توان اهمیت پروانه را به‌عنوان منبع نویز کاملاً درک کرد و به نظر می‌رسد که در سرعت‌های بالاتر از ۲۵ گره، غالب است.

نویز پروانه شامل مجموعه‌ای از اجزای تناوبی یا تن، در نرخ تیغه و چند برابر آن، همراه با طیفی از نویز با فرکانس بالا به دلیل کاویتاسیون و اثرات لایه‌مرزی تیغه است. شکل ۲ طیف نویز پروانه کاویتاسیونی را بر اساس تحلیل باند اکتاو یک‌سوم نشان می‌دهد. سطوح فشار صوت به سطح ۱ میلی پاسکال بر اساس استاندارد ارجاع می‌شود [۳].

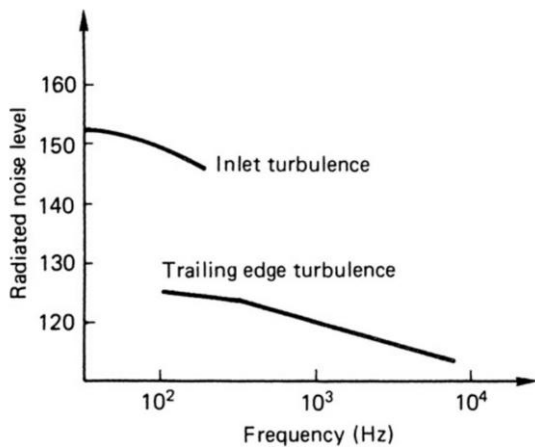


شکل ۲- طیف نویز کاویتاسیونی اندازه‌گیری شده در خارج بدنه شناور

این طیف نویز ناشی از سرعت تیغه معمولاً زیر آستانه قابل شنیدن است؛ اگرچه کمتر از حد تشخیص سنسور نیست. معمولاً در مورد پروانه‌های چهارپره که با سرعت ۲۵۰ دور در دقیقه کار می‌کنند؛ این فرکانس نرخ تیغه ۱۶/۷ هرتز را به دست می‌دهد که درست کمتر از حد معمول است. محدوده شنیداری انسان در حدود ۲۰ تا ۲۰۰۰۰ هرتز را تشخیص می‌دهد [۳].

برای بررسی بیشتر نویز تولیدی، مناسب‌تر است که به‌طور جداگانه به مسائل نویز بدون کاویتاسیون و با کاویتاسیون پرداخته شود. اولی، اگرچه برای اکثر کشتی‌های تجاری در نظر گرفته نمی‌شود؛ اما در مورد

<sup>1</sup> wake



شکل ۴- تراز نویز تابشی یک هیدروفویل صلب متحرک در آب

موضوع بهینه‌سازی پروانه‌های دریایی برای نویز در شرایط زیر کاویتاسیونی به صورت نظری هنوز در مراحل ابتدایی است زیرا راه‌حل کامل به یک محاسبه دقیق جریان ویسکوز روی پره‌های پروانه همراه با طیف آشفتگی ورودی بعلاوه داده‌های میدان دنباله‌آنیاز دارد. این موضوع را در زمینه پروانه دریایی بدون کاویتاسیون بیشتر مورد بحث قرار می‌دهیم.

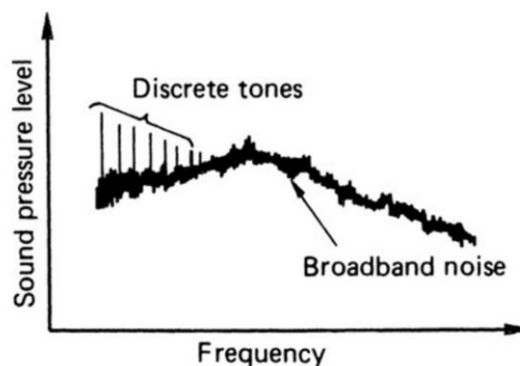
### ۳- نویز کاویتاسیون

درست قبل از شروع کاویتاسیون قابل‌مشاهده، یک افزایش سطح نویز اندازه‌گیری شده در یک محدوده فرکانس نسبتاً باریک دیده شده است. فروپاشی حباب‌های کاویتاسیون امواج شوک ایجاد می‌کند و در نتیجه نویز ایجاد می‌کند. این در اصل «نویز سفید» است که یک باند فرکانسی تا حدود ۱ مگاهرتز را پوشش می‌دهد. از دیدگاه تئوری، موضوع تابش نویز توسط کاویتاسیون تا همین اواخر از رفتار یک حباب کاویتاسیون منفرد به گونه‌ای که دینامیک حباب در یک میدان فشار متغیر در نظر گرفته می‌شد، بررسی می‌شد؛ به‌عنوان مثال، در امتداد سطح یک بخش تیغه پروانه [۵]. در این شرایط، حباب دچار نوسانات حجمی می‌شود و در نتیجه انرژی صوتی ساطع می‌شود. با استفاده از این رویکرد، چگالی توان طیفی مجموعه‌ای از حباب‌ها حاصل ضرب تعداد حباب‌ها در واحد زمان و چگالی انرژی طیفی به دلیل رشد و فروپاشی یک حباب می‌شود.

کشتی‌های تحقیقاتی و کشتی‌های دریایی که متکی بر توانایی عملیات بی‌صدا به‌منظور انجام کار خود یا شناسایی تهدیدات بالقوه هستند؛ نیازمند توجه بیشتری است. برای این موارد اخیر، یک طراح تلاش می‌کند تا محدوده عملیات غیرکاویتاسیونی کشتی را تا آنجا که ممکن است گسترش دهد.

### ۲- نویز پروانه بدون کاویتاسیون

پروانه شناور در حالت غیرکاویتاسیونی و نیز همراه با سایر اشکال توربو ماشین‌آلات، یک مشخصه نویز مطابق شکل ۳ تولید می‌کند.



شکل ۳- طیف نویز غیرکاویتاسیونی پروانه

از این شکل مشاهده می‌شود که تون‌های متمایز مرتبط با فرکانس‌های تیغه همراه با نویز پهن باند در فرکانس‌های بالاتر وجود دارد. طیف پهنای باند شامل اجزایی است که از تلاطم جریان ورودی به پروانه و اثرات لایه‌مرزی و لبه‌های مختلف مانند فروپاشی گرداب<sup>۱</sup> و نویز لبه‌های انتهایی به دست می‌آیند.

در تحلیل مکانیسم‌های نویز پهن باند، به نویز لبه انتهایی کمتر توجه می‌شود زیرا شامل دانش دقیق جریان در اطراف لبه انتهایی است. نقش ویسکوزیته در لایه‌مرزی یک پارامتر مهم در تخمین سطوح نویز تابشی تولید شده است و در حال حاضر موضوع تحقیق و پژوهش است. با این حال، بلیک در مطالعه خود یک نمایی از سطوح نسبی نویز تلاطم لبه انتهایی و ورودی پروانه را مورد بررسی قرار داد (شکل ۴) [۴].

<sup>2</sup> Wake

<sup>1</sup> vortex

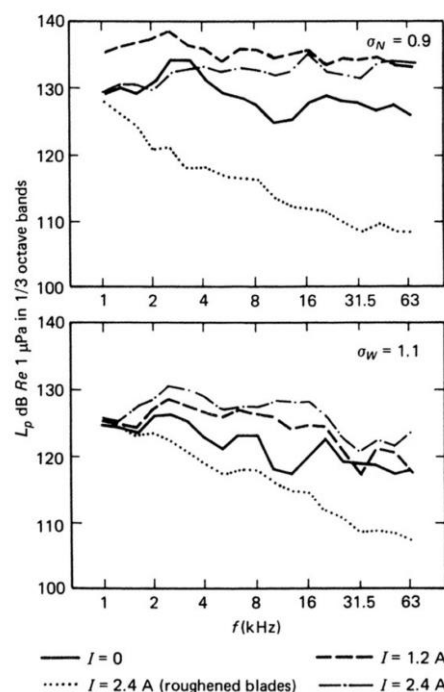
Type of cavitation	Properties of sound contributing to the discrete spectrum
	0 → 1
Sheet	
Cloud	
Tip vortex	
Hub vortex	
Mid-chord bubble	
Root	
	1 ← 0
	Proportion of sound contributing to the continuous spectrum

شکل ۱- سهم نسبی انواع مختلف کاویتاسیون در طیف توان صوتی

پیش‌بینی نویز ناشی از کاویتاسیون با روش‌های نظری پیچیده‌تر از پروانه غیر کاویتاسیونی است و در نتیجه، بیشتر پیش‌بینی‌ها با استفاده از پروانه‌های مدلی که در یک تونل کاویتاسیون کار می‌کنند انجام شده است. در حال حاضر، ناتوانی بسیاری از روش‌های نظری برای در نظر گرفتن لایه‌مرزی دقیق و دینامیک کاویتاسیون، ارزش آنها را محدود می‌کند.

ماتوزیاک<sup>۲</sup> یک طرح نظری برای ارزیابی نویز ناشی از یک پروانه کاویتاسیون دار که عمدتاً دارای کاویتاسیون صفحه‌ای است را توسعه داد [۱]. مدل انتشار نویز مورد استفاده در این روش، یک تقریب صوتی خطی است که برای یک محیط همگن نامحدود، پخش کروی را ارائه می‌دهد. این رویکرد یک طیف فشار باندپهن ناشی از پروانه تولید می‌کند که نشان داده شده به‌طور کلی با نتایج اندازه‌گیری شده برای پروانه‌های کاویتاسیون‌دار ارتباط دارد. انتشار نویز با فرکانس بالا از یک پروانه غیر کاویتاسیونی در نظر گرفته نمی‌شود و به دلیل اینکه این روش مبتنی بر تحلیل جریان پتانسیل است، اثرات جریان ویسکوز را در نظر نمی‌گیرد و بنابراین، نویز اندازه‌گیری شده در اعداد رینولدز پایین را پیش‌بینی نمی‌کند. به‌طور مشابه، فقدان محاسبات جریان لزج نیز ممکن است به مشکلات پیش‌بینی با اثرات کاویتاسیونی لبه‌های پیشرو پروانه‌های بسیار اریب کمک کند و تأثیر گردابه‌های نوک نادیده گرفته شود. چوی و همکاران [۸] انتشار نویز از حباب‌های

با این حال، چنین مدل‌هایی فقط تا حدی رفتار واقعی تیغه‌های پروانه کاویتاسیون‌دار را پیش‌بینی می‌کنند و در قابلیت پیش‌بینی خود در تراکم حباب‌های بسیار بالا کارایی لازم را ندارند. کارهای آراکری و شانموگانتان [۶] و ون در کویچ [۷] این نتیجه را تأیید می‌کنند. ون در کویچ با آزمایش مدل بر روی تیغه‌های صاف و زبر نشان داد که نویز ایجاد شده توسط کاویتاسیون حباب، در ابتدا با افزایش تعداد حباب‌ها افزایش می‌یابد و سپس در صورت وجود حباب‌های بیشتر به‌طور قابل توجهی از بین می‌رود. شکل ۵ برگرفته از پژوهش ون در کویچ [۷] این اثر را نشان می‌دهد.



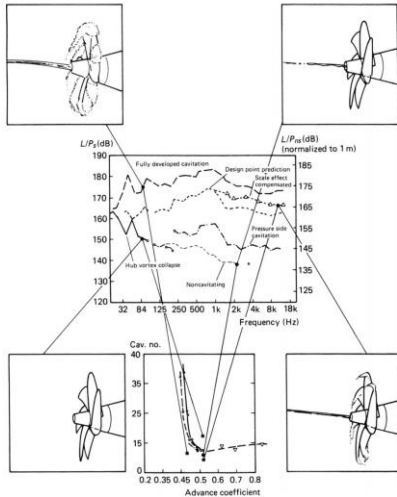
شکل ۵- طیف فشار صوتی اندازه‌گیری شده، نتایج با تیغه‌های صاف، مقایسه با نتایج با تیغه‌های زبر

در مورد تیغه صاف، چگالی حباب‌های مختلف توسط جریان الکترولیز متغیر از ۰ تا ۲٫۴ آمپر القا می‌شود؛ در حالی که در مورد تیغه زبر تعداد زیادی حباب ایجاد می‌شود.

شکل ۶، بر اساس پژوهش بلیک<sup>۱</sup>، به‌صورت شماتیک سهم نسبی انواع مختلف کاویتاسیون را در طیف توان صوتی نشان می‌دهد [۳]. از این رو، می‌توان از تأثیری که یک نوع کاویتاسیون خاص بر روی طیف نویز پیوسته یا گسسته دارد اطلاع یافت.

<sup>2</sup> Matusiak

<sup>1</sup> Blake



شکل ۷- تأثیر نوع کاویتاسیون طیف نویز

طیف وسیعی از طیف‌های نویز ناشی از یک پروانه را در چهار شرایط بارگذاری خاص می‌توان مشاهده کرد. اندازه‌گیری نویز در حال حاضر یکی از ویژگی‌های منظم بسیاری از برنامه‌های آزمایش تونل کاویتاسیون است. هدف از این آزمایش‌ها می‌تواند مقایسه طیف‌های نویز ناشی از شرایط بار مختلف برای یک پروانه باشد. مقایسه بین پروانه‌های مختلف یا پیش‌بینی در مقیاس کامل طیف نویز تحت شرایط بار مشخصه متفاوت برای یک طراحی خاص. با این حال، زمانی که مطالعه نویز در یک تونل کاویتاسیون انجام می‌شود، وجود دیواره‌های تونل تا حدی بر نتایج تأثیر می‌گذارد که نتایج، بدون اصلاح، معرف شرایط میدان آزاد نیستند. در نتیجه، یک ضریب تصحیح باید با جایگزین کردن یک منبع نویز کالیبره شده به جای پروانه ایجاد شود تا بتوان مقایسه کرد که سطح نویز در میدان آزاد بدون دیواره‌های تونل چقدر بود.

#### ۴- پیش‌بینی و کنترل نویز

اگر پیش‌بینی قطعی گسیل طیف‌های نویز از یک ترکیب پروانه-کشتی خاص مورد نیاز باشد؛ در حال حاضر، مطالعات آزمایش مدل تنها ابزار واقعی برای دستیابی به این هدف است. بارک (۱۹۸۶) همبستگی قابل دستیابی و دلایل احتمالی برای هرگونه اختلاف همبستگی بین مدل و مقیاس کامل را مورد بحث قرار می‌دهد [۱۴]. شکل ۸ که از بارک گرفته شده است، همبستگی خوبی از نویز بی‌بعد در باندهای اکتا سوم با استفاده از میانگین سطوح را نشان می‌دهد.

کاویتاسیون گردابی را بررسی کرده‌اند. این امر شامل رشد، شکافتن و فروپاشی حباب‌های کاویتاسیونی گردابی برای یک گرداب منفرد شده است. گردابی که افت فشار و بازیابی را تجربه می‌کند و گردابی که با گرداب قوی‌تر دیگری در تعامل است.

آنها دریافتند که ویژگی‌های میدان فشار اطراف و گردابه‌های خط تأثیر زیادی بر پدیدارشناسی حباب دارند، حتی زمانی که تغییرات متوسط بودند. سالواتوره و همکاران روشی را برای مدل‌سازی کاویتاسیون ناپایدار و نویز پیشنهاد کرده‌اند. مدل آنها بر اساس یک فرمول جریان پتانسیل و یک کاویتاسیون صفحه‌ای است [۹].

مدل برای تخمین الگوهای کاویتاسیون گذرا بر روی تیغه‌های پروانه سوار شده است. با توجه به انتشار نویز از پروانه، این تخمین‌ها بر اساس معادله ویلیامز و هاوکینز [۱۰] است که میدان فشار آکوستیک ایجاد شده توسط بلند کردن اجسام تحت حرکت دلخواه و کار بعدی دی فرانسیسکانتونو [۱۱] را توصیف می‌کند.

ویتن و همکاران شبیه‌سازی صدای پروانه را با استفاده از یک رویکرد ترکیبی دومرحله‌ای انجام داد [۱۲]. همبستگی بین نتایج CFD آنها با استفاده از کد FINFLO، نشان داد که انتشار نویز پیش‌بینی شده معقول بود. علاوه بر این، مشخص شد که استفاده از مدل‌های مختلف آشفتگی به‌طور قابل‌توجهی بر میدان جریان در دنباله پروانه و شبیه‌سازی نویز ناشی از آن تأثیر می‌گذارد. صدای ساطع شده توسط پروانه کاویتاسیون دار به نوع کاویتاسیون موجود در شرایط عملیاتی خاص بستگی دارد. به‌عنوان مثال، انواع کاویتاسیون گردابی پشت، جلو، تویی و نوک همگی دارای علائم نویز متفاوتی هستند (شکل ۷) [۱۳].



$$L \cong 175 + 610 \log \frac{U_T}{25} + \log \frac{Z}{4} \quad (1)$$

که در آن  $U_T$  سرعت نوک در محدوده ۱۵ تا ۵۰ متر بر ثانیه و  $Z$  تعداد تیغه‌های کاویتاسیون شونده است. در استفاده از این عبارت، باید به خاطر داشت که در آن زمان کشتی‌ها عمدتاً با طرح‌های پروانه معمولی مجهز بودند و بنابراین معادله فوق برای پروانه‌هایی با طرح‌های پیشرفته بارگیری تیغه قابل اجرا نخواهد بود.

کنترل نویز ساطع شده از پروانه را می‌توان با تلاش برای اندازه‌گیری کنترل با طراحی مجدد سطوح تیغه پروانه یا با فرض عدم امکان بهبود طراحی، با تلاش برای سرکوب صوتی از طریق کشتی انجام داد.

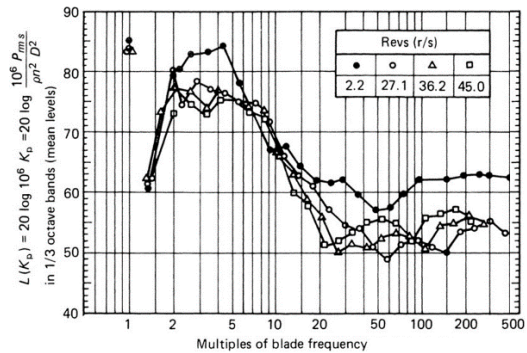
سرکوب نویز داخل کشتی به محاسبه مسیرهای نویز در کشتی و طراحی یک سیستم سرکوب مناسب می‌پردازد؛ به این ترتیب، این جنبه خارج از محدوده این متن است و باید به کارهایی مانند مورو [۱۶] اشاره کرد. در مواردی که لازم است نویز در منبع سرکوب شود؛ این امر می‌تواند با در نظر گرفتن برای مثال یکی از گزینه‌های زیر یا ترکیبی از گزینه‌های زیر حاصل شود:

۱. طراحی مجدد فرم بدنه برای بهبود میدان ویک.
۲. تغییر در توزیع شعاعی چولگی.
۳. تغییر در توزیع گام شعاعی.
۴. تنظیم پروفایل‌های بخش عمومی.
۵. تغییر در هندسه لبه جلو و یا لبه انتهایی.
۶. تغییرات در طول وتر بخش.

#### ۵- اندازه‌گیری نویز تابشی

اندازه‌گیری نویز تشعشعی جنبه مهمی از آزمایش‌های کشتی‌های جنگی سطحی و زیردریایی‌ها در زمینه تشخیص سونار و سیستم‌های ناوبری اژدر است. علاوه بر این، چنین آزمایش‌هایی مرحله مهمی را در توسعه طراحی‌های آینده کشتی‌ها تشکیل می‌دهند. علاوه بر کشتی‌های جنگی، کشتی‌های تخصصی خاص مانند کشتی‌های تحقیقاتی نیز نیاز به کنترل نویز تشعشعی دارند و بنابراین از آزمایش‌های انتشار نویز بهره می‌برند. اندازه‌گیری‌های نویز تشعشعی در محدوده‌های نویز که مخصوصاً برای این منظور قرار گرفته و ساخته شده‌اند؛ انجام می‌شوند.

برای اهداف اندازه‌گیری، حداقل باید از دو هیدروفون استفاده شود: یکی مستقیماً در زیر مسیر کشتی و دیگری در فاصله‌ای از یک طرف مسیر - نه کمتر از ۱۰۰ متر از



شکل ۸- نویز غیربعدي به صورت  $L(Kp)$  در باندهای اکتاو سوم (میانگین سطوح) ارائه شده است. مقایسه داده‌های تمام مقیاس (نمادهای پر) با داده‌های مدل در سه سرعت آب (نمادهای باز)

نمودار، نتایج را برای چندین سرعت مختلف نشان می‌دهد.

بارک در مطالعه خود، پیشنهاد می‌کند که بهترین همبستگی با بالاترین سرعت آب پیدا شد. با این حال، واضح است که اگر این مقدار به مقدار خیلی زیادی افزایش یابد، نویز فرکانس بالا توسط حباب‌های گاز کاهش می‌یابد. همچنین از شکل ۸ مشاهده می‌شود که شکل طیف هم در مقیاس مدل و هم در مقیاس کامل مشابه است، اگرچه انحرافات خاصی در مقیاس بندی فرکانس مشاهده خواهد شد. اینها را می‌توان به بازتاب موج در بدنه یا تفاوت در فرضیات مقیاس بندی کاویتاسیون نسبت داد.

اگر آزمایش‌های مدل را نتوان انجام داد یا به هر دلیلی در نظر گرفت؛ هنوز هم می‌توان بر اساس اندازه‌گیری‌های قبلی صدای پروانه را تخمین زد. با این حال، این نوع پیش‌بینی به اندازه آزمایش‌های مدل دقیق نیست. در نتیجه، باید با احتیاط از آن استفاده شود؛ زیرا مقادیر به دست آمده بر اساس داده‌های تاریخی است و بنابراین ممکن است به طور دقیق برای مطالعات پروژه‌های جدید قابل استفاده نباشد. حالت معمولی این نوع روش، داده‌های مربوط به طیف نویز تابش شده از کشتی سطحی است که در طول جنگ جهانی دوم ساخته شده است و در خلاصه‌ای که توسط دفتر تحقیقات علمی و توسعه ایالات متحده در سال ۱۹۴۵ منتشر شد، گزارش شده است.

راس [۱۵]، سطح کلی اندازه‌گیری شده در باند از ۱۰۰ هرتز تا ۱۰ کیلوهرتز را بر اساس تابعی از سرعت نوک پروانه و تعداد تیغه و برای کشتی‌های بیش از ۱۰۰ متر بیان کرد:

مسیر. عمق آب مهم است و هیدروفون واقع در مسیر کشتی نباید در عمق کمتر از ۲۰ متر باشد و اگر عمق آب بین ۲۰ و ۶۰ متر باشد باید در کف کاشته شود. برای مناطقی که عمق آنها بیش از ۶۰ متر است؛ هیدروفون باید در عمقی از سطح یک سوم عمق آب قرار گیرد. علاوه بر این، محدوده نويز آزمایشی باید به گونه‌ای انتخاب شود که سطوح پس‌زمینه آکوستیک بسیار کمتر از سطوح احتمالی ساکت‌ترین ماشین‌هایی باشد که باید ارزیابی شوند و سطح بازتاب پایین ناچیز باشد.

هدف این دو هیدروفون متفاوت است. موردی که در مسیر کشتی قرار دارد، در درجه اول برای مطالعه دقیق طیف نويز در محدوده فرکانس ۱۰-۱۲۰۰ هرتز در نظر گرفته شده است، درحالی‌که پرتو هیدروفون به محدوده فرکانس وسیع‌تری از ۱۰ تا ۸۰۰۰۰ هرتز در ارتباط با تشخیص سونار و اژدر نگاه می‌کند. اطلاع از ویژگی‌های عملکرد هیدروفون‌ها به‌ویژه مهم است و باید به آیین‌نامه‌های عملی مورد توافق اشاره کرد: برای مثال، STANAG [۱۷] توافقی است استانداردسازی ناتو را برای این اهداف و همچنین برای انجام آزمایش‌ها شرح می‌دهد.

برای اهداف این آزمایش‌ها، باید در شرایط ثابت با حداقل استفاده از سکان نگهداری شود. سوابق سرعت اسمی، سرعت واقعی، سرعت موتور اصلی و محور پروانه، گام پروانه، ویژگی‌های ارتعاش و غیره باید در طول و قبل از آزمایش‌ها حفظ شود تا سرعت شروع کاویتاسیون پیش‌رانه‌ها مشخص شود. علاوه بر این، سوابق آب‌وهوا باید حفظ شود زیرا آب‌وهوا می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر طیف نويز اندازه‌گیری شده داشته باشد؛ به‌ویژه اگر باران می‌بارد. سرعت چرخش شفت دقیق و طیف ارتعاش موارد اصلی و کمکی مهم‌تر ماشین‌آلات باید ثبت شود. در جاهایی که تغییرات زیادی در پیش‌نویس عملیاتی رخ می‌دهد. علاوه بر این، اندازه‌گیری طیف نويز از کشتی زمانی که کشتی بین شناورها لنگر انداخته است؛ با استفاده از اندازه‌گیری‌های جانبی نیز مفید است.

علاوه بر پیکربندی اندازه‌گیری‌های نسبتاً ساده برای اندازه‌گیری نويز، قابلیت‌های پیشرفته‌تری نیز می‌تواند برای اهداف تجزیه و تحلیل مشخصه دقیق‌تر به کار گرفته شود. علاوه بر انواع روش‌های اندازه‌گیری مکان ثابت که قبلاً به آنها اشاره شده است، روش شناور اندازه‌گیری نويز

قابل حمل نیز وجود دارد که می‌تواند به‌ویژه برای انجام اندازه‌گیری‌های سریع در دریا در آب‌های عمیق مفید باشد. این روش اساساً به این صورت است که در شرایط آب و هوایی نسبتاً آرام، شناور سونار را در دریا انداخته و سپس با دانستن موقعیت شناور سونار، با سرعت مطلوب و در فاصله مشخصی از شناور به عقب برگردید. سپس، با دانستن مختصات و خط سفر کشتی، استخراج یک طیف نويز برای کشتی به یک موضوع نسبتاً ساده تبدیل می‌شود.

زونگونگ و همکاران [۱۸] یک قابلیت آزمایشی برای استفاده در یک مخزن آب برای اندازه‌گیری شدت صوتی و قدرت پروانه واتر جت توسعه داد. این دستگاه شامل آرایه‌ای از دو هیدروفون تک‌بعدی بود که در حالت اسکن قوس دایره‌ای مرتب شده بودند. به دنبال برنامه آزمایشی، ادعا می‌شود که این دستگاه اندازه‌گیری خطای مطلق کمتر از ۲ dB را برگردانده و به تکرارپذیری ۱,۵dB دست یافته است.

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی پنج مکانیسم اصلی نويز پروانه شناورها پرداخته شد؛ که عبارتند بودند از:

۱. جابجایی آب توسط نیم‌رخ تیغه پروانه
۲. اختلاف فشار بین مکش و سطوح تحت فشار تیغه پروانه زمانی که در حال چرخش هستند.
۳. جریان بر روی سطوح تیغه‌های پروانه.
۴. نوسانات دوره‌ای وجود کاویتاسیون ناشی از عملکرد تیغه‌ها در میدان دنباله متغیر پشت کشتی
۵. فرآیندهای فروپاشی ناگهانی حباب کاویتاسیون.

بیان شد که نويز پروانه شامل دو جزء اصلی کاویتاسیونی و غیر کاویتاسیونی است که البته تمام اجزای نويز ناشی از ماشین‌آلات، بدنه و پروانه قبل از شروع کاویتاسیون و نويز مربوط به آن است و از اهمیت برخوردارند اما پس از شروع کاویتاسیون، با وجود نويز بدنه و منابع ماشین‌آلات، نويز پروانه معمولاً عامل غالب می‌شود. همچنین بیان شد که نويز پروانه در سرعت‌های بالاتر از ۲۵ گره، غالب است. این طیف نويز ناشی از سرعت تیغه معمولاً زیر آستانه قابل شنیدن است و تون‌های متمایز مرتبط با فرکانس‌های تیغه همراه با نويز پهن باند در فرکانس‌های بالاتر وجود دارد. طیف پهنای باند شامل اجزایی است که از تلاطم جریان ورودی به پروانه و اثرات

propellers; the effects of leading edge roughness. In: Proc. 2nd Int. Symp. on Cavitation and Multiphase Flow Noise, ASME, December.

[8] Choi, J., Chang, N., Yakushiji, R., Dowling, D.R., Ceccio, S.L., 2006. Dynamics and noise emission of vortex cavitation bubbles in single and multiple vortex flow. In: 6th Int. Symp. on Cavitation (CAV 2006), Wageningen. September.

[9] Salvatore, F., Testa, C., Ianniello, S., Pereira, F., 2006. Theoretical modelling of unsteady cavitation and induced noise. In: 6th Int. Symp. on Cavitation (CAV 2006), Wageningen, September.

[10] Ffowcs-Williams, J.E., Hawkins, D.L., 1969. Sound generated by turbulence and surfaces in arbitrary motion. Philos. Trans. R. Soc. A 264, 321–342.

[11] di Francantonio, P., 1995. The prediction of sound scattered by moving bodies. In: 1st AIAA/CEAS Aero-acoustics Conf., AIAA Paper 95-112, Munich, May.

[12] Vittenen, V.M., Hynninen, A., Tanttari, J., Sipilä, T.P., Leubka, L., Klose, R., Siikonen, T.L., 2017. CFD and CHA simulation of the underwater noise induced by a propeller in two-phase flow. In: Proc. Smp'17, Espoo, Finland.

[13] Sunnersjö, S., 1986. Propeller noise prediction. SSPA Highlights. 2.

[14] Bark, G., 1986. Prediction of propeller cavitation noise from model tests and its comparison with full scale data (SSPA Report No. 103).

[15] Ross, D., 1976. Mechanics of Underwater Noise. Pergamon Press, Oxford.

[16] Morrow, R.T., 1988. Noise design methods for ships. In: Trans. RINA, Spring Meeting. (Paper No. 7).

[17] STANAG, 1984. Standards for Use When Measuring and Reporting Radiated Noise Characteristics of Surface Ships, Submarines, Helicopters, Etc. in Relation to Sonar Detection and Torpedo Acquisition Risk (STANAG No. 1136NATO).

[18] Zonglong, W., Youlin, C., Cai, Y., Li, N., 2017. Design and verification of a noise test device for water-jet propulsion pumps. In: Proc. Smp'17, Espoo, Finland, pp. 22–27.

لایه‌مرزی و لبه‌های مختلف مانند فروپاشی گرداب<sup>۱</sup> و نویز لبه‌های انتهایی به دست می‌آیند.

فروپاشی حباب‌های کاویتاسیون<sup>۱</sup> امواج شوکی ایجاد می‌کند که منجر به تولید نویز می‌شود. این در اصل «نویز سفید» است که یک باند فرکانسی تا حدود ۱ مگاهرتز را پوشش می‌دهد. همچنین نشان داده شد که صدای ساطع شده توسط پروانه کاویتاسیون‌دار به نوع کاویتاسیون موجود در شرایط عملیاتی خاص بستگی دارد. به‌عنوان مثال، انواع کاویتاسیون گردابی پشت، جلو، تویی و نوک همگی دارای علائم نویز متفاوتی هستند.

برای سرکوب برخی روش‌ها به شرح زیر پیشنهاد شد:

۱. طراحی مجدد فرم بدنه برای بهبود میدان ویک.

۲. تغییر در توزیع شعاعی چولگی.

۳. تغییر در توزیع گام شعاعی.

۴. تنظیم پروفایل‌های بخش عمومی.

۵. تغییر در هندسه لبه جلو و یا لبه انتهایی.

۶. تغییرات در طول وتر بخش.

#### ۷- مراجع:

[1] Matusiak, J., 1992. Pressure and Noise Induced by a Cavitating Marine Screw Propeller (Ph.D. Thesis). VTT, Espoo.

[2] van Oossanen, P., 1974. Calculation of Performance and Cavitation Characteristics of Propellers Including Effects of Non-Uniform Flow and Viscosity (Publication No. 457).

[3] Blake, W.K., 1984. Aero-hydroacoustics for ships. Vols. I and II (DTNSRDC. Report No. 84/010).

[4] Jenkins, C.J., 1985. Optimizing propellers for noise. In: Advances in Underwater Technology, Ocean Science and Offshore Engineering. vol. 15. Tech. Common to Aero and Marine Engineering.

[5] Fitzpatrick, H.M., Strasberg, M., 1956. Hydrodynamic sources of sound. In: Proc. 1st Symp. on Naval Hydrodyn., Washington, DC, September.

[6] Arakeri, V.H., Shanmuganthan, V., 1985. On the evidence for the effect of bubble interference on cavitation noise. J. Fluid Mech. 159.

[7] van der Kooij, J., 1986. Sound generation by bubble cavitation on ship model

<sup>1</sup> vortex